

ESTIMACION DE LA ESTRUCTURA FOLIAR EN MASAS FORESTALES: FUNDAMENTOS TEORICOS Y ANALISIS DE LA COHERENCIA Y FIABILIDAD DE LAS MEDICIONES MEDIANTE LA APLICACION INFORMATICA TDL 2.0

J.L. BENGOA

Area de Ecología. Dpto. de Ciencias Agroforestales.
E.T.S. de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid)
34004 Palencia

RESUMEN

Se exponen los fundamentos y la metodología de estimación del índice de área foliar y del ángulo medio foliar a partir de medidas realizadas con sensores ópticos como el LAI-2000. Asimismo se presenta una aplicación informática denominada TDL 2.0 (desarrollada por el autor) que permite estimar los citados parámetros de la estructura foliar a partir de medidas realizadas con el mencionado equipo. Además el TDL lleva a cabo una valoración de la coherencia y fiabilidad de los datos y muestra en pantalla algunos resultados parciales, que permiten una valoración visual de los mismos. También se exponen las diferencias con el programa C2000.

PALABRAS CLAVE: LAI

TDL
Índice de área foliar
Ángulo medio foliar
LAI-2000
C2000

INTRODUCCION

La estructura o arquitectura foliar de las plantas juega un papel esencial en los ecosistemas, no sólo en lo referente a la intercepción de la radiación solar sino también en lo que a radiación emitida por el suelo o la intercepción de la precipitación se refiere (Evans, 1963; McNaughton, 1990). Todo ello hace que la cuantía y disposición de las hojas, tengan importantes implicaciones en el funcionamiento de los ecosistemas (Horn, 1971) y, por lo tanto, en su manejo. La productividad de los ecosistemas, la evapotranspiración, la intercepción del agua de lluvia, la protección del suelo frente a la acción erosiva de la lluvia o el régimen térmico e hídrico que hay en el interior de las comunidades vegetales son algunos de los aspectos de particular interés que merecen atención en la medida en que pueden ser dirigidos o manipulados por el hombre.

Recibido: 9-4-99

Aceptado para su publicación: 21-6-99

Por otra parte, los parámetros relacionados con la cuantía y disposición de las hojas sintetizan varios aspectos de particular significación ecológica. Esta circunstancia, unida al hecho de que son parámetros que pueden variar en poco tiempo, en respuesta a cambios del medio o del propio ecosistema, hace que tengan cierto interés como indicadores de cambios ambientales.

La ecología forestal como ciencia que proporciona el fundamento teórico y práctico para la selvicultura, presta una particular atención a todas las cuestiones relacionadas con la estructura foliar, tanto con la cuantía de la superficie foliar, como con su distribución espacial y sus implicaciones sobre el régimen radiativo, térmico e hídrico en el interior de los ecosistemas. Por su parte la selvicultura, como ciencia que se ocupa del manejo de las masas forestales, basa la mayor parte de sus técnicas en el control de la competencia (dirigiéndola para atender los objetivos que se pretendan en cada situación), con especial atención a lo que respecta a la intercepción de la luz. De hecho, las cortas de mejora y las de regeneración tienen como objetivo fundamental controlar la cantidad de luz disponible para los árboles de la masa principal en las primeras y para el regenerado en las segundas.

Las consideraciones cualitativas acerca del control de la radiación en las masas forestales siempre han tenido un papel protagonista en la ecología forestal y la selvicultura (p. ej. Campo, 1922). Sin embargo, el manejo desde el punto de vista cuantitativo, de conceptos relacionados con la superficie foliar es relativamente reciente. Su cuantificación objetiva se ha encontrado siempre con importantes limitaciones de carácter técnico y operativo. La comercialización de dispositivos que facilitan la estimación de índices relativos a la superficie y estructura del dosel foliar del bosque ha permitido en la última década incorporar medidas de este tipo al campo de la investigación forestal. El hecho de poder estimar algunos parámetros de la estructura del bosque de forma más o menos rápida, objetiva y precisa, constituye un innegable avance que debe ser aprovechado en la medida de su utilidad.

OBJETIVOS

En este trabajo se exponen los fundamentos teóricos del cálculo del índice de área foliar y del ángulo medio foliar. Asimismo, se presenta una aplicación informática destinada a elaborar los datos proporcionados por el equipo LAI-2000 (LI-COR) (Welles, 1990; Welles y Norman, 1991) con objeto de calcular algunos parámetros relacionados con la estructura foliar y valorar la coherencia y fiabilidad de los datos de partida. En particular, el programa calcula el índice de área foliar (LAI) y ángulo medio foliar (θ), así como sus correspondientes intervalos de confianza. Además, el programa valora la bondad y coherencia de las medidas, proporcionando al usuario criterios objetivos de valoración de los resultados. Aunque el equipo mencionado anteriormente cuenta con un programa propio para realizar los cálculos (C2000), éste no hace ninguna comprobación acerca de la coherencia de los datos de partida, por lo que puede proporcionar resultados inconsistentes, cuando las medidas se realizan de forma incorrecta. En definitiva, con el programa que aquí se presenta, se proporciona una herramienta destinada a mejorar la calidad de las estimaciones del índice de área foliar y a agilizar su estimación, además de proponer sencillos criterios de valoración.

Para el cálculo del índice de área foliar a partir de estimaciones de la intercepción de la luz bajo diferentes ángulos se considera un modelo que asume orientación no preferen-

cial de las hojas y distribución aleatoria. Dependiendo de hasta qué punto se cumplan estas hipótesis de partida, las estimaciones del índice de área foliar y del ángulo medio foliar obtenidas mediante el modelo, diferirán en mayor o menor medida de los valores reales. Para valorar adecuadamente esta circunstancia es necesario conocer los detalles del modelo en el que se basa el cálculo de los citados parámetros. En los siguientes apartados se exponen los fundamentos teóricos en los que se basa el modelo de estimación del índice de área foliar y ángulo medio foliar que utiliza el C2000 citado anteriormente, así como el programa que se presenta en este trabajo (TDL 2.0), que incluye pequeñas diferencias respecto a aquel. A continuación se exponen algunos conceptos básicos acerca de la estimación del índice de área foliar (para más detalles Norman y Campbell, 1989).

FUNDAMENTO TEORICO DE LA ESTIMACION DE LA ESTRUCTURA FOLIAR POR METODOS OPTICOS (EN BASE A MEDIDAS REALIZADAS CON EL EQUIPO LAI-2000)

Introducción

Se denomina índice de área foliar (leaf area index, LAI) a la superficie foliar por unidad de superficie de suelo (Watson, 1947). Cuando se trabaja con especies planifolias, el índice de área foliar se puede definir considerando una sola cara de la hoja (lo más habitual) o ambas caras. En el caso de especies aciculifolias, el LAI puede definirse en base a la superficie total de las acículas o a la superficie proyectada sobre un plano (Beadle, 1987; Nobel, Long, 1987). En este trabajo se considera una sola cara de las hojas si se trata de especies planifolias o superficie proyectada en el caso de las aciculifolias.

Se trata de una medida adimensional que también puede expresarse como m^2 de superficie de hojas por m^2 de superficie de suelo. Por cuestiones prácticas (de su estimación), la mayor parte de los autores considera que dentro del LAI van incluidas no sólo la superficie de las hojas, sino todos los componentes aéreos de las plantas. En cambio algunos autores (Hutchinson *et al.*, 1986; Neumann *et al.*, Shaw, 1989) prefieren considerar que el LAI hace alusión exclusivamente a las hojas, mientras que utilizan el concepto de índice de área de planta (Plant Area Index, PAI) para incluir todos los componentes aéreos de la planta y el índice de área leñosa (Woody Area Index, WAI o Stem Area Index, SAI) para la superficie aérea debida a los componentes leñosos de las plantas. En este texto los tejidos de sostén se tratan junto con las hojas, como si se tratase de superficies planas que interceptan la luz de igual forma que lo haría una hoja. Aunque esto no es cierto (ver, p. ej. Philip, 1966), habitualmente se asume así ya que de otra forma, el modelo se complicaría en exceso haciéndose poco operativo.

Con frecuencia, la expresión de la arquitectura foliar de los ecosistemas se reduce al índice de área foliar. No obstante, es conveniente recordar que el conocimiento de la estructura del dosel foliar abarca otros aspectos (ver p. ej. Campbell, Norman, 1990). Entre ellos:

- Inclclinación de las hojas. Dado que no todas las hojas tienen la misma inclinación, la distribución de los ángulos foliares puede expresarse mediante una función $g(\alpha)$ (función de densidad de ángulo foliar) tal, que entre α y $\alpha + d\alpha$ existe una superficie foliar por unidad de volumen de $g(\alpha) \cdot d\alpha$. El ángulo medio foliar (valor medio de la función $g(\alpha)$) sintetiza este aspecto de la estructura foliar. La integral de la

función $g(\alpha) \cdot d\alpha$ en todo el rango de α (0 a $\pi/2$) está directamente relacionada con el índice de área foliar (ver más adelante).

- Orientación de las hojas. Habitualmente se admite distribución azimutal uniforme o, lo que es lo mismo, orientación no preferente de las hojas. Esta circunstancia ha sido verificada o asumida para muchas especies tanto herbáceas como arbóreas (Warren Wilson, 1959; Lang *et al.* 1985 y 1986; Hutchinson *et al.*, 1986 entre otros).
- El perfil vertical del área foliar. Con frecuencia ocurre que la densidad foliar en el tercio superior de la copa es mayor que la del resto de la copa, lo cual puede justificarse en términos de competencia por la luz y eficacia fotosintética (Mohren, Bartelink, 1990). Sin embargo a efectos de los siguientes razonamientos se considerará que el dosel foliar presenta una densidad foliar (F) uniforme. Las diferencias de densidad foliar con la altura obliga, en su caso, a estudiar la estructura foliar por estratos.

Cuando se desea expresar de forma sintética la cuantía y disposición de las hojas, se acude al índice de área foliar y ángulo medio foliar. No obstante también se pueden considerar otros indicadores sintéticos que, como los anteriores, son combinación lineal de la distribución angular de las hojas (discretizando la función $g(\alpha)$) y tienen cierta significación ecológica. Anderssen y Jackett (1985) proponen algunos de estos parámetros. De forma igualmente sintética, la dimensión fractal de las copas también caracteriza la estructura foliar con bastante significación ecológica (López Arias *et al.*, 1993) en cuanto que es consecuencia directa de la mayor o menor intercepción de la luz y punto de compensación de la fotosíntesis.

A continuación se resumen los fundamentos del cálculo del índice de área foliar y del ángulo medio foliar.

Fundamento teórico para la estimación del índice de área foliar

El fundamento teórico de la estimación de la estructura foliar está bien desarrollado en numerosas publicaciones que han ido haciendo sucesivas aportaciones en este campo (Warren Wilson, 1959b, 1963, 1965; Miller, 1963, 1967; Philip, 1965; Smith *et al.*, 1977; Oker-Blom y Kellomäki, 1983; Lang *et al.*, 1985; Lang, 1986; Perry *et al.*, 1988, etc.). Algunos trabajos recogen de forma sintética los principales fundamentos de la estimación del índice de área foliar (Campbell y Norman, 1989; Norman y Campbell, 1989). En Bengoa (1997b) se hace una revisión histórica de los primeros avances en la estimación del índice de área foliar. A continuación se expone de forma resumida los fundamentos en los que se apoya la mayor parte de los sistemas indirectos de estimación del índice de área foliar, sintetizados a partir de las publicaciones anteriormente indicadas. La nomenclatura que se utiliza a continuación es la que se indica en Bengoa (1997a).

Considérese un espacio tridimensional en el que están distribuidas las hojas de forma aleatoria con distintos ángulos de inclinación¹ (α). Se pueden hacer las siguientes consideraciones:

1. La densidad foliar (F: superficie foliar por unidad de volumen) puede calcularse a partir de la función $g(\alpha)$ anteriormente indicada, mediante la siguiente expresión:

¹ α es el ángulo foliar, es decir el ángulo entre una hoja y la horizontal (o entre la normal a la hoja y la vertical).

$$F = \int_0^{\pi/2} g(\alpha) \cdot d\alpha \quad [1]$$

donde F es la densidad foliar. Si se considera un dosel foliar continuo de un determinado espesor se puede definir el índice de área foliar como la suma de la superficie de todas las hojas por unidad de superficie de suelo. Este parámetro puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$LAI = z \cdot F \quad [2]$$

donde z es el espesor del dosel foliar.

2. Se denomina densidad foliar aparente $[F(\theta)]$ a la proyección de la superficie foliar por unidad de volumen según una dirección (θ ; ángulo cenital de proyección o muestreo) sobre un plano perpendicular a dicha dirección. La densidad foliar aparente puede obtenerse a partir de $g(\alpha)$, mediante la siguiente expresión:

$$F(\theta) = \int_0^{\pi/2} K(\alpha, \theta) \cdot g(\alpha) \cdot d\alpha \quad [3]$$

donde $K(\alpha, \theta)$ es la función de proyección normal, es decir, la proyección de la unidad de superficie foliar de inclinación α y distribución acimutal uniforme, según la dirección θ sobre un plano perpendicular a esta dirección. Esta función, que puede obtenerse teóricamente, fué deducida por varios autores de forma independiente (p. ej. Warren Wilson, 1960):

– Si $\alpha + \theta < 90^\circ$:

$$K(\alpha, \theta) = \cos(\alpha) \cdot \cos(\theta) \quad [4]$$

– Si $\alpha + \theta > 90^\circ$:

$$K(\alpha, \theta) = \cos(\alpha) \cdot \cos(\theta) \cdot \left(1 + 2 \frac{\text{tg}(\epsilon) - \epsilon}{\pi}\right) \quad [5]$$

donde:

$$\cos(\epsilon) = \cotg(\alpha) \cdot \cotg(\theta) \quad [6]$$

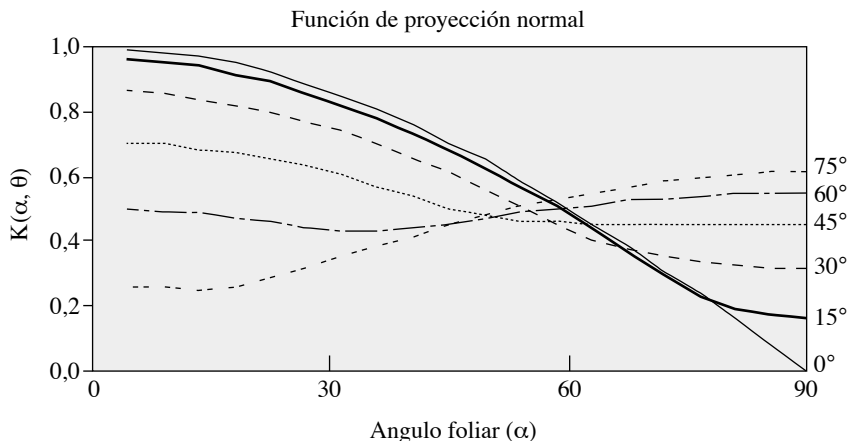


Fig. 1.-Función de proyección normal. Representa la proyección de la unidad de superficie foliar de inclinación α según una dirección θ sobre un plano perpendicular a dicha dirección.

Nota: Si se pusiera en abscisas el ángulo de muestreo (θ) y se representara una curva para cada valor del ángulo foliar (α), la figura resultante sería la misma.

Representation of Kernel function. It shows the projection of unit of foliar area with inclination α according to a direction θ over a surface normal to that direction

En la Figura 1 se muestra la representación gráfica de esta función para distintos valores de θ . Puede observarse que hay un valor de θ (alrededor de 57°) para el que el valor de $K(\alpha, \theta)$ es prácticamente constante para cualquier valor de α , esta circunstancia fue utilizada por algunos autores para estimar el LAI de forma aproximada.

Si se denomina $u(\alpha)$ (función de densidad normalizada del ángulo foliar), a $g(\alpha)/F$, es decir a la función que expresa la fracción del área foliar que presenta la inclinación α , entonces su integral para todos los valores de α (de 0 a $\pi/2$) es 1. A partir de ella, la proyección de la superficie foliar según una dirección (θ) se puede expresar también de forma unitaria para obtener la función denominada función de proyección normal de un dosel foliar determinado [$G(\theta)$]:

$$G(\theta) = \int_0^{\pi/2} K(\alpha, \theta) \cdot u(\alpha) \cdot d\alpha \quad [7]$$

La función $G(\theta)$ representa la proyección de la unidad de superficie foliar según el ángulo cenital θ sobre un plano perpendicular a esta dirección. Es una expresión de la disposición de las hojas, no de su cuantía. Está relacionada con la función de densidad foliar aparente mediante la siguiente expresión:

$$F(\theta) = G(\theta) \cdot F \quad [8]$$

De forma inversa, la función de densidad de ángulo foliar $g(\alpha)$ y la densidad foliar (F) pueden estimarse a partir de varios valores de la densidad foliar aparente [$F(\theta)$].

Como se ha comprobado, conocido $g(\alpha)$ se puede deducir el valor de $F(\theta)$ para cualquier valor de θ aplicando la integral [3]. Sin embargo el camino inverso (deducir $g(\alpha)$ a partir de la función $F(\theta)$) no resulta evidente y requiere cierto análisis que se expone a continuación. El interés de ello reside en que $F(\theta)$ puede estimarse de forma aproximada en campo, y de esta forma, puede estimarse el índice de área foliar y el ángulo medio foliar.

Este problema fue resuelto satisfactoriamente por Miller en sendas publicaciones (Miller, 1963; 1967). El citado autor (Miller, 1963) obtuvo una expresión que, teóricamente, permite calcular $g(\alpha)$ en función de $F(\theta)$. Sin embargo una de las conclusiones a las que llegó Miller, es que $g(\alpha)$ no puede deducirse con un mínimo de precisión a partir de $F(\theta)$ debido a los errores que conlleva la medición de esta última. Esto es debido a que para ello hay que calcular derivadas de 2º y 3º grado de $F(\theta)$, lo cual no es factible con un mínimo de precisión, habida cuenta de los errores de estimación de $F(\theta)$ en campo. Tras varios intentos infructuosos por parte de otros autores de aprovechar la fórmula obtenida por Miller (1963)², este mismo autor (Miller, 1967) dedujo una expresión mucho más sencilla para calcular directamente F (y, como se verá más adelante, también LAI) sin pasar por $g(\alpha)$:

$$F = 2 \int_0^{\pi/2} F(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \quad [9]$$

Estimación de la función $F(\theta)$.

Para estimar dicha función (en realidad, para estimar algunos valores de dicha función para determinados ángulos, θ) es necesario tener en cuenta lo siguiente:

La frecuencia unitaria de contactos $[V(\theta)]$, es decir, el número medio de contactos que tendría una aguja³ al recorrer una distancia unitaria dentro de un dosel foliar con un ángulo cenital θ , es un estimador de la densidad foliar aparente $[F(\theta)]$.

El número medio de contactos que tendría una aguja al atravesar un dosel foliar según un ángulo cenital θ $[N(\theta)]$ es igual al producto de $V(\theta)$ por la trayectoria recorrida (s). A su vez, la citada trayectoria es igual al espesor del dosel foliar dividido por el coseno del ángulo θ :

$$N(\theta) = \frac{V(\theta) \cdot z}{\cos(\theta)} \quad [10]$$

Por lo tanto el valor de $N(\theta) \cdot \cos(\theta)/z$ es un estimador de $F(\theta)$.

Llevar a cabo la tarea de estimar $N(\theta)$ mediante una aguja (haciendo que la aguja atravesase el dosel foliar según distintas direcciones y contando el número de contactos con las hojas) resulta, cuanto menos, laboriosa y, en la mayor parte de los casos, inabordable. En su lugar, se utilizan las siguientes consideraciones para estimar $N(\theta)$ y, por lo tanto, $V(\theta)$ y $F(\theta)$.

² Algunos autores han buscado otros procedimientos para obtener la función $g(\alpha)$ (o algunas características de dicha función) mediante diversos artificios. Más adelante se indican algunos de estos métodos.

³ Si se considera una aguja de grosor despreciable.

Se puede estimar la proporción de radiación solar que no es interceptada por las hojas en las distintas direcciones como el cociente entre la radiación bajo el dosel y la radiación sobre el mismo, ambas medidas bajo un mismo ángulo θ . La proporción de radiación solar incidente bajo un determinado ángulo, que no es interceptada por las hojas se denomina fracción de huecos $[FH(\theta)]$. Si se considera la dirección vertical ($\theta = 0^\circ$), el complementario a uno de la fracción de huecos es la cubierta o cobertura foliar (la proporción de rayos verticales que son interceptados por las hojas).

Existe una relación estadística entre la fracción de huecos y el número medio de contactos. Dicha relación estadística depende del patrón de distribución de las hojas. Si las hojas se distribuyen aleatoriamente, y son suficientemente pequeñas respecto al área total muestreada, entonces la distribución de Poisson proporciona la probabilidad $(P(\theta))$ de que un determinado rayo de sol no sea interceptado por ninguna hoja (= fracción de huecos, $FH(\theta)$):

$$FH(\theta) = P(\theta) = e^{-N(\theta)} \quad [11]$$

donde $N(\theta)$ es el número medio de contactos que tendría una aguja al atravesar un dosel foliar según un ángulo cenital θ . Por lo tanto:

$$N(\theta) = -\ln [FH(\theta)] \quad [12]$$

donde $\ln[]$ significa logaritmo neperiano.

En realidad, considerar que este fenómeno se rige por una distribución de Poisson requiere asumir dos hipótesis que, en algunos casos, se alejan bastante de la realidad:

1. Que las hojas son suficientemente pequeñas en referencia al área muestreada. Para considerar la influencia del tamaño de las hojas, es necesario acudir a la distribución binomial. Ensayando diferentes supuestos se puede comprobar que cuanto más grandes sean las hojas en relación al área en la que se mide la fracción de huecos, más se sobreestima el número de contactos y, por lo tanto, la superficie foliar al aplicar el modelo de Poisson. Welles, Norman (1991) dan algunas recomendaciones a este respecto.
2. Que las hojas se distribuyen aleatoriamente. La distribución de las hojas, que depende de la arquitectura de las plantas, por lo general, se aleja bastante del modelo aleatorio. Existen dos tendencias contrapuestas que, en parte, pueden compensarse: (1) las hojas tienden a agruparse en ramillos (distribución contagiosa) y (2), los ramillos se distribuyen con cierta tendencia hacia la regularidad dentro de las copas (depende de cada caso). Oker-Blom, Kellomaki (1983) estudian analíticamente esta circunstancia y cuantifican su importancia numérica en diversos casos. Si se considera distribución aleatoria de brotes y agrupada dentro de los brotes, se puede deducir que el modelo aleatorio infraestima el número de contactos y el LAI, en una cuantía que depende, claro está, de la arquitectura de cada especie. Los citados autores también analizan la influencia de la densidad de las masas forestales sobre la estimación del índice de área foliar y las correcciones que hay que aplicar al modelo aleatorio. Lang, Yuequin (1986) analizan la influencia que tiene el hecho de que la cubierta foliar sea discontinua sobre la estimación del LAI.

Resultado final.

Teniendo en cuenta que, como se indicó anteriormente, $F(\theta)$ puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$F(\theta) = \frac{N(\theta) \cdot \cos(\theta)}{z} \quad [13]$$

aplicando la integral de Miller (1967) (ecuación n° 9) a un dosel foliar y multiplicando ambos términos por el espesor del citado dosel (z) puede deducirse una expresión para estimar el LAI ($= z \cdot F$):

$$LAI = z \cdot F = 2 \int_0^{\pi/2} z \cdot F(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \quad [14]$$

de donde:

$$LAI = 2 \int_0^{\pi/2} N(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \quad [15]$$

A su vez, asumiendo el modelo aleatorio, se puede estimar $N(\theta)$ a partir de la fracción de huecos $[FH(\theta)]$ mediante la siguiente expresión:

$$N(\theta) \simeq -\ln[FH(\theta)] \quad [16]$$

Por su parte, la fracción de huecos, puede estimarse bajo distintos ángulos a partir de la transmitancia de la radiación solar o a partir de fotografías tomadas desde el suelo hacia el dosel foliar.

Si se sustituye $N(\theta) \cdot \cos(\theta)$ por $N_h(\theta)$, la expresión resultante es:

$$LAI = 2 \int_0^{\pi/2} N_h(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \quad [17]$$

La función $N_h(\theta)$, denominada frecuencia de contactos, representa el número medio de contactos que se obtiene al atravesar el dosel foliar con un ángulo cenital θ y recorriendo una distancia igual al espesor del dosel foliar (z). Su valor también es igual al producto de $z \cdot V(\theta)$.

Fundamento teórico para la estimación del ángulo medio foliar

Para expresar la inclinación de las hojas se puede calcular el ángulo medio foliar ($\bar{\alpha}$) en lugar de estimar la función $g(\alpha)$ que, como se indicó anteriormente, difícilmente puede

estimarse con un mínimo de fiabilidad. Existen distintos modelos de distribución de los ángulos de las hojas, algunos de los cuales se exponen más adelante (modelos elipsoidal y beta).

Lang (1986) propuso un sencillo método gráfico que permite estimar fácilmente el ángulo foliar medio. Este se basa en la hipótesis de que la función $G(\theta)$ real se parece a la correspondiente a un dosel foliar cuyas hojas presentan, todas ellas, un mismo ángulo foliar ($\bar{\alpha}$), igual, por lo tanto, al ángulo medio que se desea estimar. La posible imprecisión del método de Lang es pequeña en comparación con el margen de error que conlleva el asumir algunas hipótesis o el error asociado a la toma de datos de campo. Si todas las hojas tuvieran un mismo ángulo cenital ($\bar{\alpha}$) y orientación azimutal uniforme, la forma de la función de proyección normal $[G(\theta)]$ mencionada anteriormente se podría deducir (en función de $\bar{\alpha}$ y θ), como se indica a continuación.

Si todas las hojas presentan la misma inclinación ($\bar{\alpha}$), la función $G(\theta)$ es igual a la $K(\alpha, \theta)$ mencionada anteriormente. Teniendo en cuenta que $N_h(\theta) = z \cdot V(\theta) = z \cdot F(\theta) = z \cdot F \cdot G(\theta) = LAI \cdot G(\theta)$, entonces:

$$K(\alpha, \theta) = G(\theta) = -\frac{N_h(\theta)}{LAI} - \quad [18]$$

La representación gráfica de $K(\alpha, \theta)$ para distintos valores de α y θ se representa en la Figura 1. Dentro de un cierto rango de valores de θ (de 25° a 65°), esta familia de curvas $[K(\alpha, \theta)]$ correspondiente a distintos valores de α , puede asimilarse a un conjunto de líneas rectas de distinta pendiente. La relación entre esta pendiente y el ángulo puede deducirse de forma teórica. Su representación gráfica se expone en la Figura 2.

Como se muestra en la Figura 2, a cada valor de α ($\bar{\alpha}$) le corresponde una determinada pendiente, lo que permite estimar $\bar{\alpha}$ a partir de la estimación de la citada pendiente (b). A su vez, la pendiente (b) se estima a partir de los distintos valores de $G(\theta)$:

$$b = -\frac{d[K(\alpha, \theta)]}{d\theta} = -\frac{d[G(\theta)]}{d\theta} - \quad [19]$$

Por lo tanto, conocido $N_h(\theta)$ y LAI se puede estimar $G(\theta)$; a partir de ella, la derivada de $G(\theta)$ respecto a θ ; y a partir de este valor se puede estimar α , conocida la relación entre ambas variables.

OTROS MODELOS

Estimación de la función $g(\alpha)$

Como se indicó anteriormente, $g(\alpha)$ no puede deducirse con un mínimo de precisión a partir de $F(\theta)$ debido a los errores que conlleva la medición de esta última. Sin embargo varios autores han propuesto distintos métodos para estimar de forma aproximada dicha función. Tal es el caso de Philip (1965) que diseñó una metodología para deducir $g(\alpha)$ amortiguando la función $F(\theta)$ mediante series de Fourier e invirtiendo matemáticamente la integral (3). Esta metodología no fue seguida por otros autores.

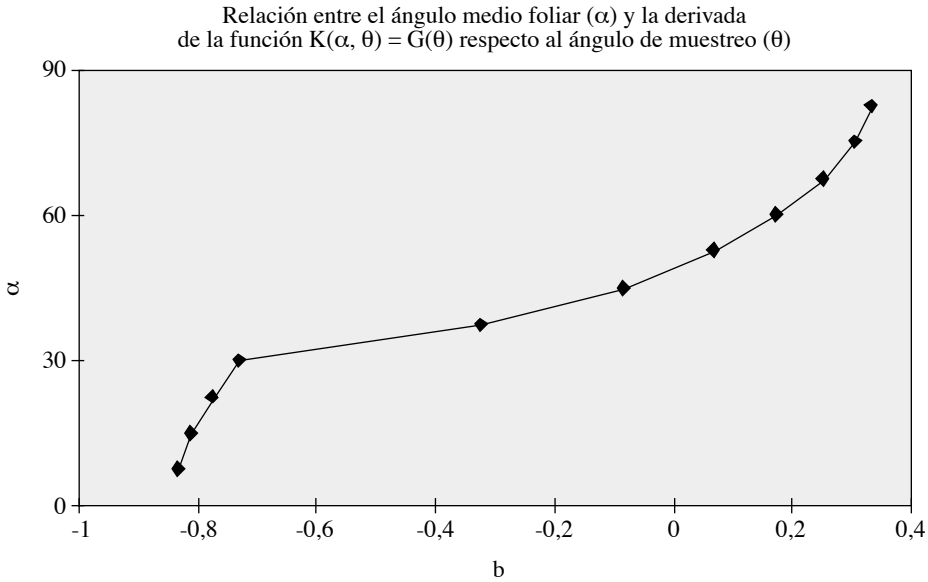


Fig. 2.—Gráfico que permite estimar el ángulo medio foliar (α) cuando se conoce el coeficiente b , que es la pendiente de la recta que representa la función $G(\theta)$ frente a θ

Curve for estimating mean foliar angle (α) from the coefficient b , which is the slope of the regression of $G(\theta)$ on θ

Se han obtenido resultados más satisfactorios discretizando la función $g(\alpha)$ en tres o cuatro clases y haciendo la inversión de la integral (3) por mínimos cuadrados, obteniendo de esta forma tan solo tres o cuatro puntos de la función. Sean por ejemplo tres intervalos: 0° - 30° ; 30° - 60° ; 60° - 90° . La superficie foliar LAI (desconocida) puede considerarse que se reparte en tres intervalos: LAI_1 , LAI_2 y LAI_3 de inclinación media α_1 , α_2 y α_3 , respectivamente. Teniendo en cuenta que:

$$F = \int_0^{\pi/2} g(\alpha) \cdot d(\alpha) \quad \rightarrow \quad LAI = z \cdot F = \int_0^{\pi/2} z \cdot g(\alpha) \cdot d\alpha \quad [20]$$

de donde, considerando tres intervalos de α :

$$LAI = LAI_1 + LAI_2 + LAI_3 = \int_0^{\pi/6} z \cdot g(\alpha) \cdot d\alpha + \int_{\pi/6}^{2\pi/6} z \cdot g(\alpha) \cdot d\alpha + \int_{2\pi/6}^{3\pi/6} z \cdot g(\alpha) \cdot d\alpha \quad [21]$$

Asumiendo, en cada una de estas tres integrales, su correspondiente ángulo foliar medio (α_1 , α_2 y α_3) entonces ésta integral puede expresarse como:

$$N_h(\theta) = K(\alpha_1, \theta) \cdot LAI_1 \cdot \Delta\alpha_1 + K(\alpha_2, \theta) \cdot LAI_2 \cdot \Delta\alpha_2 + K(\alpha_3, \theta) \cdot LAI_3 \cdot \Delta\alpha_3 \quad [22]$$

o, expresado de forma genérica:

$$N_h(\theta) = \sum_{i=1}^n K(\alpha_i, \theta) \cdot LAI_i \cdot \Delta\alpha_i \quad [23]$$

Estimando $N_h(\theta)$ para distintos ángulos cenitales, la anterior expresión se convierte en un sistema de ecuaciones en el que las incógnitas son LAI_i , los coeficientes son los valores de $K(\alpha_i, \theta_j)$ y los términos independientes $N_h(\theta_j)$. Se trata de un sistema en el que el número de ecuaciones excede al número de incógnitas, y cuya solución debe buscarse mediante mínimos cuadrados (minimizando errores).

Un inconveniente de este método es debido a que suele ocurrir que la solución mínimo-cuadrática no es la óptima, debido a que los resultados son incoherentes o imposibles (por ejemplo, pueden obtenerse valores negativos de LAI_i). Esto depende de los errores cometidos al estimar $N_h(\theta)$. Se pueden mejorar los resultados aplicando restricciones a la función que se desea minimizar. Norman, Campbell (1989) proponen minimizar otra función que con la que se consigue que no salgan valores de LAI_i negativos.

Perry *et al.* (1988) proponen una solución ligeramente diferente. Esta consiste en suponer que $u(\alpha) = g(\alpha)/LAI$ tiene forma polinómica [$u(\alpha) = c_1 + c_2\alpha + c_3\alpha^2 + c_4\alpha^3$], de forma que el objetivo de la inversión consiste en estimar los coeficientes de dicho polinomio. Son por lo tanto estos coeficientes, las incógnitas del sistema de ecuaciones. Además proponen diversas restricciones para que los resultados sean coherentes.

Otros modelos de distribución angular

Un modelo que se asume con cierta frecuencia consiste en suponer una distribución elipsoidal de la superficie foliar; es decir, que la superficie angular presenta la misma distribución angular que un elipsoide de revolución. Según el elipsoide sea más achatado o alargado, las hojas presentarán una disposición más horizontal o vertical. El parámetro que caracteriza esta distribución es el cociente entre el eje horizontal y el eje vertical del elipsoide (parámetro x). Anteriormente se calculó la proyección de la unidad de superficie foliar según un ángulo cenital sobre un plano perpendicular a esta dirección suponiendo que las hojas presentan una inclinación constante y distribución azimutal uniforme. De igual forma puede procederse suponiendo que las hojas presentan una distribución elipsoidal. Campbell (1986) y Norman, Campbell (1989) deducen sendas expresiones (aproximadas) para esta función que denominaremos $K'(x, \theta)$. Obsérvese que $K'(x, \theta)$ es función del citado parámetro x y del ángulo cenital θ , en lugar de α y θ . En cualquier caso existe una relación directa (aproximada) entre x y el valor medio de α (Wang, Jarvis, 1988).

Goel, Strebel (1984) proponen utilizar la distribución beta para expresar la distribución angular de las hojas. Estos autores no proponen un método de estimación de los parámetros de la distribución a partir de las medidas de $N_h(\theta)$. En el caso de que se conocieran algunos puntos de la función $g(\alpha)$ se puede ajustar la citada función beta estimando los parámetros μ y v a partir del ángulo foliar medio, $\text{med}(\alpha)$ y su varianza $\text{Var}(\alpha)$.

LA APLICACION INFORMATICA TDL V 2.0

Introducción

La aplicación informática que se presenta en este trabajo sigue en lo esencial (aunque con algunas diferencias) la metodología de cálculo indicada anteriormente, que corresponde a la que utiliza el equipo LAI-2000 y el programa C2000 para sus cálculos. El TDL utiliza para sus cálculos, las medidas realizadas con el LAI-2000. Previamente es necesario transferir los datos medidos con el equipo de campo a un PC, donde quedan almacenados como fichero de datos, utilizando para ello la utilidad de comunicaciones que acompaña al citado equipo. El TDL utiliza como datos de partida los contenidos en el citado fichero, en el formato en que quedan éstos al ser transferidos al PC (el mismo formato que utiliza la aplicación C2000). Durante la ejecución del programa, los datos son transferidos a una base de datos de dBase, que es el formato con el que trabaja esta aplicación y, por lo tanto, el formato en el que se almacenan los resultados, para su posterior consulta y manipulación.

Con objeto de acercar al usuario el control de los cálculos, durante la ejecución del programa, se van presentando en pantalla de forma gráfica aproximada, las medidas y algunos resultados parciales para una valoración visual. Además, los resultados quedan almacenados en el fichero de resultados, que es una base de datos de formato dBase. En este fichero, además de los valores del índice de área foliar y el ángulo medio foliar se incluyen sus correspondientes intervalos de confianza y una valoración de los datos según diversos criterios que se exponen más adelante.

A continuación se describe la metodología de cálculo del TDL, sus diferencias con el C2000 y los criterios de valoración utilizados para evaluar la fiabilidad y coherencia de las medidas. Los detalles de manejo del TDL y del formato en el que se presentan los resultados, se explican con detalle en las ayudas que acompañan al programa, a las que se accede ejecutando el programa y pulsando [F1]. Este programa es libre y puede obtenerse en el servidor FTP de la ETSIIAA en la dirección de internet <ftp://www.palencia.uva.es/>. Si tiene algún problema para bajarse el programa envíe un mail a jbengoam@nexo.es

Estimación del índice de área foliar (LAI)

Los datos de partida, tanto para el C2000 como para el TDL son las estimaciones de transmitancia bajo distintos ángulos de muestreo (θ), que proporciona el LAI-2000. Este equipo estima la transmitancia (=fracción de huecos) como cociente entre las lecturas del sensor debajo [$B(\theta)$] y encima [$A(\theta)$] del dosel foliar.

$$FH(\theta) = \frac{B(\theta)}{A(\theta)} \quad [24]$$

El LAI-2000 mide la radiación solar difusa bajo cinco ángulos distintos, correspondientes con los cinco anillos de su sensor óptico. El anillo 1 mide el intervalo de ángulos cenitales de 0° a 15° , el anillo 2, de 15° a 30° , el anillo 3, de 30° a 45° , el anillo 4, de 45° a 60° y el anillo 5, de 60° a 75° . En adelante a las lecturas bajo cubierta [$B(\theta)$] se denominarán B1, B2, B3, B4 y B5 (genéricamente B#) y las de referencia [$A(\theta)$] se denominarán

A1, A2, A3, A4 y A5 (genéricamente A#). Los correspondientes valores de la transmitancia y, por lo tanto, de la fracción de huecos (FH#) son iguales a los cocientes B#/A#.

El número de contactos [N(θ)] se estima asumiendo distribución aleatoria de las hojas:

$$N_h(\theta) = N(\theta) \cdot \cos(\theta) = -\text{Ln}[\text{FH}(\theta)] \cdot \cos(\theta) \quad [25]$$

donde FH(θ) representa la fracción de huecos correspondiente al ángulo cenital θ. Es decir, para los distintos valores de #, de 1 a 5:

$$N_h\# = N\# \cdot \cos(\theta\#) = \text{Ln}[\text{FH}\#] \cdot \cos(\theta\#) \quad [26]$$

A partir de dichos valores se puede estimar el LAI mediante la integral de Miller:

$$\text{LAI} = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} N(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} N_h(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta \quad [27]$$

Como únicamente se dispone de valores discretos de $N_h(\theta)$ [$N_h\#$], la integración debe hacerse de forma numérica, considerando intervalos de θ y asignando a cada intervalo su correspondiente $N_h\#$ y θ#.

Por lo tanto la anterior integral se convierte en un sumatorio para los correspondientes intervalos y valores de θ. Considerando seis intervalos de 15° se cubre todo el rango de 0 a 90° (0 a π/2):

$$\text{LAI} = 2 \cdot \sum_{\# = 1}^6 N\# \cdot \cos(\theta\#) \cdot \sin(\theta\#) \cdot \Delta\theta\# = 2 \cdot \sum_{\# = 1}^6 N_h\# \cdot \sin(\theta\#) \cdot \Delta\theta\# \quad [28]$$

Con el equipo LAI-2000 se estiman los valores de A# y B# (y, por lo tanto, FH# y $N_h\#$) para los intervalos de θ siguientes: (0°-15°), (15°-30°), (30°-45°), (45°-60°), (60°-75°). Asumiendo que la estimación de $N_h\#$ puede asumirse válida también para el intervalo (60°-90°) (aunque corresponde al intervalo 60°-75°) entonces los seis intervalos se pueden reducir a cinco. Basándose en este supuesto, el C2000 calcula el LAI mediante la siguiente expresión:

$$\text{LAI} = 2 \cdot (N_{h1} \cdot 0,034 + N_{h2} \cdot 0,104 + N_{h3} \cdot 0,160 + N_{h4} \cdot 0,218 + N_{h5} \cdot 0,484)$$

Otra alternativa, que es la que sigue el TDL para sus cálculos, consiste en considerar seis intervalos: (0°-15°), (15°-30°), (30°-45°), (45°-60°), (60°-75°) y (75°-90°) con sus correspondientes valores medios de θ# 7,5°, 22,5°, 37,5°, 52,5°, 67,5° y 82,5°. Teniendo en cuenta que el LAI2000 estima A# y B# (y, por lo tanto, FH# y $N_h\#$) para los cinco primeros intervalos, los valores correspondientes al intervalo (75°-90°) pueden obtenerse por regresión lineal a partir de los demás valores, como se indica más adelante. En este caso, el sumatorio resultante es:

$$\begin{aligned} \text{LAI} = & 2 \cdot (N_{h1} \cdot 0,03417 + N_{h2} \cdot 0,10019 + N_{h3} \cdot 0,15937 + \\ & + N_{h4} \cdot 0,20770 + N_{h5} \cdot 0,24187 + N_{h6} \cdot 0,25956) \end{aligned}$$

donde:

N_{h1} a N_{h5} son los valores $N_{h\#}$, respectivamente, para los cinco intervalos de $\theta\#$ en los que se mide la transmitancia (suponiendo que estos se consideren fiables; ver aclaraciones en el apartado de valoración de los datos).

N_{h6} es el valor correspondiente al intervalo de 75° a 90° , estimado por regresión a partir de los anteriores, como se indica más adelante.

Estimación del ángulo medio foliar (α)

Conocido el LAI se puede estimar el ángulo medio foliar de la siguiente forma. Se calculan los correspondientes valores de $G\#$ mediante la siguiente expresión:

$$G\# = \frac{N\# \cdot \cos(\theta\#)}{LAI} = \frac{N_{h\#}}{LAI} \quad [29]$$

A continuación se ajusta una recta de regresión de $G\#$ frente a $\theta\#$ y se utiliza la pendiente de esta recta (b) para estimar el valor de α mediante la siguiente expresión aproximada⁴:

$$\alpha \simeq 46,7787 + 41,3974 \cdot b + 133,617 \cdot b^2 + 161,2204 \cdot b^3 \quad [30]$$

Su representación gráfica se muestra en la Figura 3.

Esta expresión corresponde al ajuste de un polinomio de tercer grado a la serie de valores $[\alpha; d(K(\alpha, \theta)/d\theta)]$ ($n = 11$, $R^2 = 0,98$) cuya representación gráfica se muestra en la Figura 2. Se recuerda que si todas las hojas tienen una misma inclinación α , entonces la función $G(\theta)$ es igual a la $K(\alpha, \theta)$. El cálculo del ángulo medio foliar se basa en ese supuesto.

Dado que se puede estimar la varianza de b (varianza de la pendiente de la recta de regresión) y por lo tanto un intervalo de confianza para este parámetro, también puede establecerse un intervalo de confianza aproximado para α utilizando el polinomio que relaciona ambas variables. Un intervalo de confianza muy amplio puede reflejar que la distribución de valores de $G(\theta)$ no es asimilable a la correspondiente a un dosel foliar con ángulo α constante (supuesto en que se basa Lang para estimar el ángulo medio foliar). La irregularidad en la distribución de las hojas y otras fuentes de error en la estimación de la fracción de huecos, también pueden generar intervalos muy amplios de α . En definitiva, la amplitud de este intervalo de confianza, expresa en cierta forma la coherencia de los datos y su correspondencia con el modelo aplicado.

Cuando, en una misma parcela, se toman varias estimaciones de LAI y α , se pueden estimar sus varianzas dentro de la parcela y establecer un intervalo de confianza para la media de ambos índices. El programa, al presentar los resultados medios de cada parcela o serie, proporciona los valores del índice de área foliar y ángulo medio foliar junto con sen-

⁴ Esta función se ha obtenido por regresión de los valores teóricos de α frente a $K(\alpha, \theta)$. Si se ajusta un polinomio de 5º grado se obtiene la siguiente expresión:

$$\alpha = 56,81964 + 46,84833 \cdot b - 64,62133 \cdot b^2 - 158,6914 \cdot b^3 + 552,0626 \cdot b^4 + 1.008,149 \cdot b^5$$

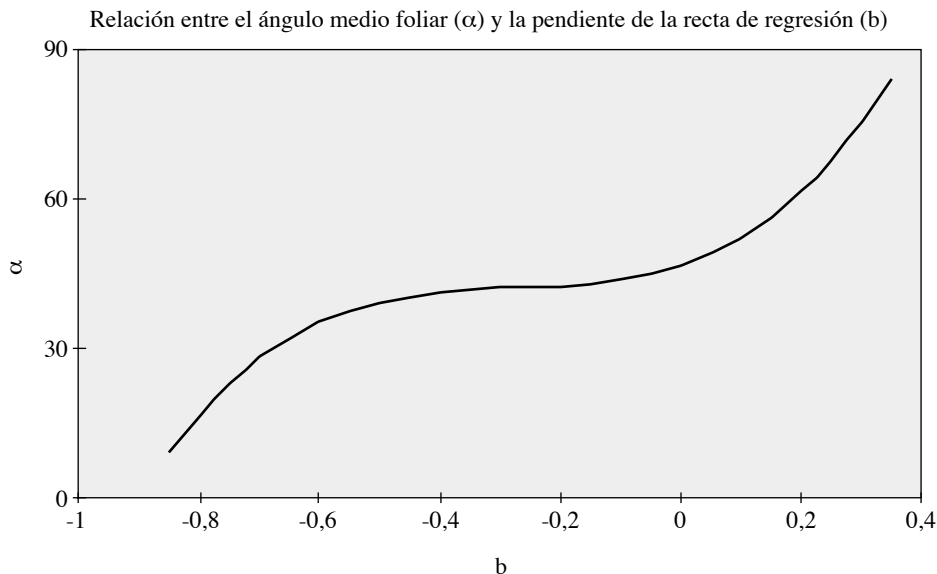


Fig. 3.—Gráfico que permite estimar el ángulo medio foliar (α) cuando se conoce el coeficiente b ($=dG(\theta)/d\theta$). Esta figura corresponde al ajuste de un polinomio de 3º grado a la serie de puntos de la Figura 2
Curve for estimating mean foliar angle (α) from the coefficient b ($= dG(\theta)/d\theta$).
This line is obtained by regression of α on b with a third degree equation using data of Figure 2

dos intervalos de confianza del 95 % para sus respectivas medias (basándose para ello en la distribución t de Student).

Evaluación de los datos

La aplicación TDL hace un análisis de la coherencia y fiabilidad de los datos, según varios criterios, asignando, para cada uno de ellos la calificación de:

“Rechazables” si se consideran incoherentes o muy poco fiables.

“Aceptables con reservas” si se aprecian algunas deficiencias, aunque el resultado puede ser más o menos fiable.

“Correctos” si no se aprecia ninguna incoherencia ni deficiencia.

El programa evalúa los datos según varios criterios, de forma que, según va haciendo los cálculos, muestra en pantalla su correspondiente valoración (y lo graba en el fichero de resultados). Las medidas individuales se agrupan en series (conjunto de datos tomados en una misma parcela, con objeto de promediar sus resultados).⁵ Normalmente, cada serie

⁵ Cada serie se corresponde a un “FILE” en el LAI-2000.

consta de una, dos o tres referencias (A#), y varias medidas bajo cubierta (B#). La serie resultante contiene tantas estimaciones del LAI como medidas B# se hayan realizado en la parcela (se puede utilizar una misma referencia para varias medidas B#). En cada parcela, la valoración de los datos sigue tres pasos: en primer lugar se evalúan de forma conjunta las medidas de referencia (A#) de la parcela o serie; a continuación se evalúan los datos correspondientes a cada medida (B#) dentro de la serie; y por último, una vez calculada la serie, se hace una valoración conjunta de los resultados.

Valoración conjunta de las referencias de una serie

Se consideran los siguientes criterios de valoración:

CRITERIO A-1 Presencia de obstáculos sobre el horizonte que pueden invalidar los anillos 4 y 5.

La necesidad de realizar una medida de la radiación sobre la cubierta forestal presenta el inconveniente de que es necesario encontrar un claro en el bosque suficientemente amplio⁶ como para que no haya ningún obstáculo dentro del campo de visión del sensor. Debe tenerse en cuenta que el sensor mide la radiación en un rango de ángulos cenitales desde 0° a 75°, lo que obliga a que, al hacer la medida de referencia, no haya ningún obstáculo que se eleve más de 15° sobre el horizonte. La presencia de obstáculos por encima de esta elevación puede invalidar las lecturas realizadas con el anillo 5 o, si el obstáculo se eleva por encima de 30°, los anillos 4 y 5. El programa TDL comprueba que los valores de A4 y A5 no sean anormalmente bajos, lo que podría ser indicio de que existe algún obstáculo dentro del campo de visión del sensor.

El criterio considerado es el siguiente. En el caso de que, en alguna de las referencias, tanto A4 como A5 sean inferiores a 0,7 veces el valor medio de A2, A3 y A4, ambos valores se consideran poco fiables (se interpreta que ello puede ser debido a la presencia un obstáculo que no permitía realizar las medidas de referencia correctamente) y los datos se consideran “rechazables”. En caso contrario, si en alguna referencia, la lectura A5 es inferior a 0,7 veces el valor medio de A2, A3 y A4, el programa considera que dicho valor de A5 no es muy fiable y los datos se consideran “aceptables con reservas”. En los demás casos, todos los valores de A# se consideran, en principio, fiables y los datos se consideran “correctos” en lo que respecta a este criterio de valoración.

Al analizar cada medida de la serie (B#) se valora nuevamente la referencia (A#) que corresponda a cada una de las medidas B#. Como se indica más adelante (ver criterio B1), los cálculos se realizan con los valores B#/A# que se consideren correctos, sustituyendo los no válidos por una estimación de los mismos realizada a partir de los que se consideran adecuados.

CRITERIO A-2 Homogeneidad de la iluminación, es decir, valoración de si llega radiación directa a alguno de los anillos.

El equipo LAI2000 está diseñado para funcionar con luz difusa. Para ello el cielo debe estar adecuadamente cubierto de nubes, de forma que el sol apenas se vislumbre a través

⁶ O elevar el sensor por encima del dosel foliar, lo que, con frecuencia, resulta bastante difícil.

de ellas. Si el valor de la referencia A# correspondiente a uno de los anillos es claramente superior a las demás, se considera que este anillo recibe radiación directa desde el sol (mientras que a los demás sólo llega radiación difusa). En este caso la medida no se considera adecuada.

En particular, la referencia se considera “rechazable” si alguno de los valores A1, A2, A3, A4 o A5, es superior a 1,5 veces el valor medio de los cinco anillos, en cuyo caso se considera que el cielo no está suficientemente cubierto por las nubes. En caso contrario, si alguno de dichos valores es superior a 1,3 veces la media de dichas referencias (A#), los datos se consideran “aceptables con reservas”. En los demás casos, los datos se consideran “correctos” en lo que respecta a este criterio de valoración. Al analizar cada medida de la serie (B#) se valora nuevamente la correspondiente referencia (A#), según este mismo criterio, como se indica más adelante.

Las medidas también son inadecuadas si el dosel foliar recibe radiación directa, aunque ésta no incida sobre el sensor. Sin embargo esta circunstancia no puede ser evaluada a la vista de los datos, sino en campo. Welles, Norman (1991) estiman que, cuando la radiación solar directa incide sobre el dosel foliar el LAI-2000 subestima en LAI en una cantidad cercana 0,7 unidades, lo que puede suponer porcentajes del LAI bastante elevados, que van del 11 al 56 p. 100, según los casos. Estos mismos autores también recogen algunos ensayos donde ponen de manifiesto el error que se produce en la estimación del LAI cuando la iluminación no es homogénea, como ocurre al amanecer o al anochecer. En estos casos, los errores de estimación del LAI son menores y no suelen superar el 10 p. 100.

CRITERIO A-3 Constancia de la iluminación durante la toma de datos. Sólo se considera cuando se toman varias medidas de referencia (A#).

Dentro de cada parcela o serie (FILE) el cielo debe permanecer sin cambios importantes mientras se hacen las sucesivas medidas. Debe tenerse en cuenta que pequeños cambios en la luminosidad del cielo se traducen en estimaciones erróneas del LAI. Esto se refleja en las variaciones que existen entre las distintas medidas de referencia (A#) realizadas en una misma parcela.

El programa considera “rechazable” una referencia si, para cada ángulo cenital, alguna de las medidas A1, A2 o A3 son inferiores a 0,7 veces el valor medio correspondiente a ese ángulo cenital o superan 1,43 veces dicho valor medio y además se cumple:

$$|A1 - \bar{A1}| + |A2 - \bar{A2}| + |A3 - \bar{A3}| > 0,4 \cdot \bar{A} \quad [31]$$

donde:

A1, A2 y A3 son las medidas de los anillos 1, 2 y 3, de cada una de las referencias de la serie.

$\bar{A1}$, $\bar{A2}$ y $\bar{A3}$ son sus correspondientes valores medios para toda la serie.

\bar{A} es el valor medio de $\bar{A1}$, $\bar{A2}$ y $\bar{A3}$.

Es decir, que las desviaciones respecto a la media son importantes si se consideran los tres primeros anillos (no se consideran los anillos A4 y A5 porque la presencia de obstáculos pudiera dar lugar a malas interpretaciones; se considera que nunca hay obstáculos con una elevación superior a 45°).

Se consideran “aceptables con reservas” si, para cada ángulo cenital, alguna de las medidas A1, A2 o A3 son inferiores a 0,9 veces el valor medio de las medidas correspondientes a ese ángulo cenital o superan 1,11 veces dicho valor medio y además se cumple:

$$|A1 - \bar{A}| + |A2 - \bar{A}| + |A3 - \bar{A}| > 0,3 \cdot \bar{A} \quad [32]$$

En los demás casos se considera que no hay evidencias de cambios importantes en la radiación solar, durante la toma de muestras. Al analizar la serie de forma conjunta, se valoran nuevamente las referencias (A#), según este mismo criterio, como se indica más adelante.

Valoración de cada medida dentro de la serie

Después de valorar de forma conjunta las medidas de referencia (A#), el programa hace una valoración de los datos para cada medida bajo cubierta (B#). Esta valoración redunda en algunos aspectos mencionados anteriormente para las medidas de referencia, pero particularizado para la referencia que corresponda a la medida B# en cuestión.

CRITERIO B-1 Presencia de obstáculos en el horizonte que pueden invalidar los anillos 4 y/o 5.

Se utiliza para ello el criterio A-1 indicado para la valoración conjunta de las medidas de referencia. En el caso de que A4 o A5 se consideren no válidos, el programa comprueba si los valores A2, A3, A4, A5 decrecen de forma más o menos continua o hay un salto brusco de A3 a A4 o de A4 a A5 con el siguiente criterio:

- Si $(A4 - A5) < 2 \cdot (A3 - A4)$ y $(A3 - A4) < 2 \cdot (A2 - A3)$ se considera que el descenso de $A2 > A3 > A4 > A5$ es gradual.
- En caso contrario, se considera que hay descenso brusco, lo que apoya la hipótesis de un obstáculo con una elevación de 15° a 30° , que impide que la luz llegue correctamente al anillo 5 o de 30° a 45° , que impide que la luz llegue correctamente a los anillos 4 y 5.

En el caso de que el descenso se considere gradual y, por lo tanto haya dudas sobre la presencia de un obstáculo que anule alguno de los anillos, esta circunstancia se indica en pantalla.

El usuario puede cambiar, durante la ejecución de los cálculos, el número de anillos considerados al calcular el LAI. Asimismo, el programa sustituye los valores de A# que se consideran no válidos (y por lo tanto, sus correspondientes N# y $N_h\#$) por otros obtenidos por regresión lineal, utilizando para ello los $N_h\#$ que sí se consideran válidos. Para ello se asume que existe una relación más o menos lineal entre $\theta\#$ y $N_h\#$ (cosa que es relativamente cierta, al menos para valores altos de $\theta\#$). El valor de N_{h6} , que no se mide directamente también se estima por regresión a partir de los $N_h\#$ que sí se consideran válidos. El criterio para estimar los valores de $N_h\#$ que sean necesarios es el siguiente:

- a) Si todas las lecturas se consideran válidas, el valor de N_{h6} se estima ajustando una recta a los pares de valores de $(\theta\#, N_h\#)$ correspondientes a los anillos 2, 3, 4 y 5. Con la recta de regresión se infiere el valor correspondiente a $\theta 6$.

- b) Si se considera que únicamente la medida A5 es no válida entonces los valores de N_{h5} y N_{h6} se estiman ajustando una recta a los pares de valores de $(\theta\#, N_{h\#})$ correspondientes a los anillos 2, 3 y 4. Con la recta de regresión se infiere el valor correspondiente a $\theta5$ y $\theta6$.
- c) Si se considera que ni la medida A4 ni la A5 son válidas entonces el valor de N_{h4} , N_{h5} y N_{h6} se estiman ajustando una recta a los pares de valores de $(\theta\#, N_{h\#})$ correspondientes a los anillos 1, 2 y 3. Con la recta de regresión se infiere el valor correspondiente a $\theta4$, $\theta5$ y $\theta6$. En este caso, se puede considerar que los datos son de muy baja calidad y los resultados son, por lo tanto, muy poco fiables.

CRITERIO B-2 Homogeneidad de la iluminación, es decir, valoración de si llega radiación directa a alguno de los anillos.

Se utiliza para ello el criterio A-2 indicado para la valoración conjunta de las medidas de referencia.

CRITERIO B-3 Coherencia de los valores $N\#$ y $N_{h\#}$

Además de la valoración de las referencias ($A\#$) anteriormente indicada, el TDL hace otra comprobación de los datos verificando que en ninguno de los anillos ocurre que $B\# > A\#$ (que en teoría es imposible). Esta circunstancia puede presentarse en el caso de cubiertas muy claras con medidas poco rigurosas (por ejemplo medidas tomadas en un momento en que el cielo no está estable y hay cambios en la irradiancia). En el caso de que haya algún $B\#$ superior a su correspondiente $A\#$, el TDL califica a la medida completa como “rechazable”.

El TDL también comprueba que no se obtengan valores atípicos de $N_{h\#}$ (aparte del ya mencionado, que se obtendría cuando $B\# > A\#$). Se considera que los valores de N_{h2} , N_{h3} y N_{h4} no deben ser mucho menores a N_{h1} y N_{h5} a la vez, ya que ningún modelo de distribución de hojas genera esta distribución de valores de $N_{h\#}$. Por lo tanto, si alguno de los valores N_{h2} o N_{h3} o N_{h4} es inferior a la mitad del valor medio de todos los $N_{h\#}$, los datos se consideran “aceptables con reservas”. En los demás casos las medidas se consideran “correctas”.

Valoración de la serie de forma conjunta

Al finalizar los cálculos correspondientes a cada serie, el programa hace una nueva valoración de los datos con los siguientes criterios.

CRITERIO C-1 Resumen de los criterios B-1, B-2 y B-3.

Según este criterio, la serie se valora:

“Rechazable” si alguna medida de la serie que haya sido considerada en los cálculos queda valorada como “rechazable” por los criterios B-1, B-2 o B-3.

“Aceptable con reservas” si, no siendo “rechazable”, alguna medida de la serie que haya sido considerada en los cálculos queda valorada como “aceptable con reservas” por estos criterios.

“Correcta” en los restantes casos, es decir, si todas las medidas consideradas en los cálculos se consideran correctas.

CRITERIO C-2 Detección de tendencias crecientes o decrecientes en la serie de valores de LAI.

El programa TDL considera que las medidas incluidas en una serie o parcela están tomadas bajo una misma cubierta. Al estimar los valores medios por serie se valora la secuencia de valores de LAI resultantes. Si esta secuencia es uniformemente creciente (o decreciente), se deduce que o bien se han hecho las medidas realizando un transepto de una zona clara a una densa (o viceversa) o bien se han hecho bajo condiciones de irradiancia cambiantes, considerándose entonces que la media no puede considerarse estable. Para valorar esta circunstancia, se sigue el siguiente procedimiento: se estiman los parámetros de la regresión del LAI frente a n (siendo n el número de orden de la medida dentro de la secuencia de medidas de la parcela). Si el intervalo de confianza del 95 p. 100 para la pendiente de la regresión lineal contiene al 0, la serie se considera "correcta". En caso contrario, si el intervalo de confianza del 99,9 p. 100 para la pendiente contiene al 0, la serie se considera "aceptable con reservas". En el resto de los casos se deduce que hay un claro ascenso o descenso de los valores de LAI de la serie y además este ascenso o descenso es cuantitativamente importante y por lo tanto la serie se considera "rechazable".

En el caso de que la serie se considere "aceptable con reservas", si la pendiente de la citada recta de regresión es inferior a 0,02 y el intervalo de confianza del 95 p. 100 para el LAI tiene una amplitud inferior a 0,2 unidades, entonces dicha tendencia creciente tiene poca trascendencia cuantitativa sobre la estimación del LAI medio de la serie. Asimismo, aunque la serie se considere rechazable, si la citada pendiente es inferior a 0,02 y el intervalo de confianza del 95 p. 100 para el LAI tiene una amplitud inferior a 0,3 unidades, entonces aún tratándose de una medida deficiente el resultado es, cuanto menos orientativo; en caso contrario, el resultado no se considera en absoluto fiable.

CRITERIO C-3 Constancia de la iluminación durante la toma de datos. Sólo se considera cuando se toman varias medidas de referencia (A#).

Se utiliza para ello el criterio A-3 indicado para la valoración conjunta de las medidas de referencia.

En base a todos estos criterios de cálculo el programa asigna una valoración conjunta de cada serie en forma de una "nota" que va de 0 a 10, de forma que el 10 indica que no se ha detectado ninguna deficiencia en los datos. Si la valoración es inferior a 5, se considera que los resultados no son fiables por alguna razón y deben ser rechazados. Los detalles de dicha valoración conjunta pueden consultarse en las ayudas del programa, que puede obtenerse en el servidor FTP de la ETSIIAA en la citada dirección de internet <ftp://www.palencia.uva.es/>.

CONCLUSIONES

La aplicación que se presenta en este trabajo permite valorar la coherencia y fiabilidad de las mediciones del LAI realizadas con el equipo LAI-2000. Se considera que dicha valoración (o una equivalente) resulta imprescindible para que la estimación del LAI sea mínimamente fiable.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias y en la Universidad de Valladolid (ETSIIAA de Palencia). Mi agradecimiento a ambas instituciones. Mi agradecimiento a Carlos Gracia por la lectura crítica del manuscrito.

SUMMARY

Canopy structure analysis: Metodological basis and data deliability and coherence evaluation with the application program TDL 2.0

In this paper, metodological basis for obtaining leaf area index and mean leaf inclination angle are presented. Also an application program (TDL 2.0) for estimating these parameters is presented. It makes use of data obtained from LI-COR LAI-2000 measurements, evaluates data reliability and coherence, and shows partial results on the screen for a visual assessment by the user. At last, differences with the C2000 utility are highlighted.

KEY WORDS: LAI
TDL
Leaf area index
Mean leaf inclination angle
LAI-2000
C2000

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS

- ANDERSSON R.S., JACKETT D.R., JUPP D.L.B., NORMAN J.M., 1985. Interpretation of and simple formulas for some key linear functionals of the foliage angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology* 36: 165-188.
- BEADLE C.L., 1987. Plant growth analysis. in: Coombs J., Hall D.O., Long S.P., Scurlock M.O. (eds.): *Techniques in bioproductivity and photosynthesis*. Pergamon Press. Oxford. 61 pp.
- BENGÓA J.L., 1997a. Caracterización de la estructura foliar del bosque: propuesta de nomenclatura y definiciones. I Congreso Forestal Hispano-Luso Irati 1997, Tomo 3: 81-86.
- BENGÓA J.L., 1997b. La estimación del índice de área foliar: Antecedentes históricos (1). I Congreso Forestal Hispano-Luso Irati 1997, Tomo 4: 109-114.
- BONHOMME R., CHARTIER P. 1972. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Israel J. Agric. Res.*, 22(2): 53-61.
- BONHOMME R., GRANCHER C.V., CHARTIER P., 1974. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops. *Photosynthetica* 8: 299-301.
- CAMPBELL G.S., 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology* 36: 317-321.
- CAMPBELL G.S., NORMAN J.M., 1989. The description and measurement of plant canopy structure. in: Russell G., Marshall G., Jarvis P.J. (eds.) *Plant canopies: their growth, form and function*. pp. 1-20. Cambridge University Press.
- CHAN S.S., MCCREIGHT R.W., WALSTAD J.D., SPIES T.A., 1986. Evaluating forest vegetative cover with computerized analysis of fisheye photographs. *Forest Science* 32(4): 1085-1091.
- EVANS L.T. (ed.) 1963. *Environmental control of plant growth*. pp 79-94. New York. C.S.I.R.O. Division of Plant Industry. Canberra, Australia. Academic Press. New York and London.
- GOEL N.S., STREBEL D.E., 1984. Simple Beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agronomy Journal* 76(sept-oct): 800-802.
- HORN H., 1971. *The adaptive geometry of trees*. Princetown, New Jersey Princetown University Press. 144 pp.
- HUTCHINSON B.A., MATT D.R., McMILLEN T.M., GROSS L.J., TAJCHMAN S.J., NORMAN J.M., 1986. The architecture of a deciduous forest canopy in eastern Tennessee, USA. *J. Ecol.* 74: 635-646.

- JUPP D.L.B., ANDERSON M.C., ADOMEIT G.M., WITTS J., 1980. PISCES-a computer program for analysing hemispherical canopy photographs. CSIRO Aust. Div. Land Use Res. Tech. Mem. 80/23.
- LANG A.R.G., 1986. Leaf area and average leaf angle from transmission on direct sunlight. *Austr. J. Bot.* 34: 349-355
- LANG A.R.G., 1987. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology* 41: 179-186.
- LANG A.R.G., YUEQING X., NORMAN J.M., 1985. Crop structure and the penetration of direct sunlight. *Agricultural and Forest Meteorology* 35: 83-101.
- LANG A.R.G., YUEQIN X., 1986. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and forest Meteorology* 37: 229-243.
- LOPEZ ARIAS M., GARCIA DEL BARRIO J.M., REY A., 1993. Dimensión fractal de las copas en un modelo de estructura espacial del vuelo. *Congreso Forestal Español Lourizán 1993*, Tomo I: 391-396.
- MCNAUGHTON K. G., 1990. Regional interactions between canopies and the atmosphere. in Russell G.; Marshall B., Jarvis P.G. (eds.): *Plant canopies: their growth form and function*. pp 63-82. Cambridge University Press. Cambridge.
- MILLER J.B., 1963. An Integral equation from phytology. *J. Aust. Math. Soc.*, 4: 397-402.
- MILLER J.B., 1967. A formula for average foliage density. *Aust. J. Bot.* 15: 141-144.
- MOHREN G.M.J., BARTELINK H.H., 1990. Modeling the effects of needle mortality rate and needle area distribution on dry matter production of Douglas fir. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38(1): 53-66.
- NEUMANN H.H., DEN HARTOG G., SHAW R.H., 1989. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agricultural and Forest Meteorology* 45: 325-345.
- NOBEL P.S., LONG S.P. 1987. Canopy structure and light interception. in: Coombs, J; Hall, D. O.; Long, S. P., Scurlock, M. O. (eds.): *Techniques in bioproductivity and photosynthesis*. Pergamon Press. Oxford. 61 pp.
- NORMAN J.M., CAMPBELL G.S., 1989. Canopy structure. in Pearcy et al. (eds.) *Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation*. Chapman, Hall. London. New York.
- OKER-BLOM P., KELLOMAKI S. 1983. Effect of grouping on the within-stand and within-crown light regime: comparison of random and grouping canopy models. *Agric. Meteorol.* 28: 143-155.
- OLSSON L., CARLSSON K., GRIP H., PERTTU K., 1982. Evaluation of forest-canopy photographs with diode-array scanner OSIRIS. *Can. J. For. Res.* 12: 822-828.
- PERRY S.G., FRASSER A.B., THOMSON D.W., NORMAN, J.M., 1988. Indirect sensing of plant canopy structure with simple radiation measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 42: 255-278.
- PHILIP J.R., 1965. The distribution of foliage density with foliage angle estimated from inclined point quadrats observations. *Aust. J. Bot.* 13: 357-366.
- PHILIP J.R., 1966. The use of point quadrats with special reference to stem-like organs. *Aust. J. Bot.* 14: 105-125.
- SMITH J.A.; OLIVER R.E., BERRY J.K., 1977. A comparison of two photographic techniques for estimating foliage angle distribution. *Aust. J. Bot.* 25:545-553.
- SMITH F.W., SAMPSON D.A., LONG J.N., 1991. Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception. *Forest Science* 37(6): 1682-1688.
- WANG Y.S., MILLER D.R., 1987. Calibration of the hemispherical photographic technique to measure leaf area index distributions in hardwoods forests. *Forest Science* 33(1): 210-216.
- WANG Y.P., JARVIS P.G., 1988. Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest meteorology* 43: 319-321.
- WARREN WILSON J., 1959. Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats. *New phytologist* 58: 92-101.
- WARREN WILSON J., 1959. Analysis of the distribution of foliage area in grassland. The measurement of grassland productivity. In: Ivins, J. D. (ed.) London. pp 51-61.
- WARREN WILSON J. (& REEVE J.E.), 1959. Inclined point quadrats. *New Phytologist* 59: 92-101.
- WARREN WILSON J., 1963. Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. *Aust. J. Bot.* 11: 95-105
- WARREN WILSON J., 1963. Errors resulting from thickness of point quadrats. *Aust. J. Bot.*, 11:178-188.
- WARREN WILSON J., 1965. Point quadrats analysis of foliage distribution for plants growing singly or in rows. *Aust. J. Bot.* 13: 405-409.
- WARREN WILSON J., 1965. Stand structure and light penetration. I Analysis by point quadrats. *J. Appl. Ecol.* 2: 383-390.
- WATSON D.J., 1947. Comparative physiological studies in the growth of fields crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11:41-76.
- WELLES J.M., 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote sensing reviews* 5(1): 31-43.
- WELLES J.M., NORMAN J.M., 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal*, 83 (5): 818-825.
- LAI-2000 y C2000 son marcas registradas de LI-COR.